



Saf Magnezyumda SiC ve Zr ile Tane İnceltmenin Mekanik Özelliklere Etkisi

Effect of Grain Refinement of Pure Magnesium with Zr and SiC on Mechanical Properties

Erdem Karakulak

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Umuttepe, Kocaeli

Öz

Magnezyum alaşımları düşük yoğunlukları nedeniyle birçok uygulamada tercih edilmektedir. Ancak düşük mukavemet ve sertlikleri bu alaşımların kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Malzeme tokluğunu etkilemeden mukavemet ve sertlik değerlerini arttırmanın tek yolu olan tane inceltme ile magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri geliştirilip kullanım alanları geliştirilebilir. Bu çalışmada saf magnezyum içerisine iki farklı tane inceltici (Zr ve SiC) farklı oranlarda ilave edilerek tane inceltme performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca tane inceltme sonucunda malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için sertlik, çekme ve basma testleri uygulanıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar zirkonyumun SiC'e göre daha efektif bir tane inceltici olduğunu ve mekanik özelliklerin Zr ilavesiyle daha fazla arttığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum, Mekanik özellikler, SiC, Tane inceltme, Zr,

Abstract

Magnesium and its alloys have being used in numerous applications because of their low density. However low hardness and strength of these alloys limit their usage. Applications of magnesium alloys can be widen with grain refinement which increases mechanical properties without sacrificing toughness. In this study two different grain refiners (Zr and SiC) were added to pure magnesium and their performances were compared. In addition to understand the effect of grain refinement on the mechanical properties of the material hardness, tensile and compression tests were conducted. The results showed that Zr is more effective grain refiner compared to SiC and mechanical properties of Zr refined samples are superior to SiC refined ones.

Keywords: Magnesium, Mechanical properties, SiC, Grain refining, Zr

1. Giriş

Magnezyum yapısal olarak kullanılabilen en düşük yoğunluklu metaldir. Hafifliğinin yanında iyi dökülebilirlik ve yeryüzünde çok bulunabilmesi gibi özellikleri nedeniyle magnezyum çelik ve alüminyumdan sonra dünya üzerinde en çok üretilen üçüncü metaldir (Ali vd. 2015, Lee vd. 2000a, Suh vd. 2015). Özellikle yakıt tüketiminin ve CO₂ salınımlarının sınırlandırılmasının büyük önem taşıdığı şu günlerde otomotiv sektöründeki magnezyum kullanımı her geçen gün artmaktadır (Freidrich ve Schumann 2001). Ancak sınırlı mekanik özellikleri, düşük tokluğu ve yetersiz korozyon dayanımı magnezyum alaşımlarının kullanım alanını sınırlamaktadır (Tahreen vd. 2015, Nie vd. 2015, Mao vd. 2015i Yaganed ve Saremi 2015). Mekanik özelli-

likleri iyileştirmek için Mg içerisine Ca, Sr, nadir toprak elementleri (Rare Earth - RE) gibi alaşım elementleri ilave edilir (Pekgülyüz ve Kaya 2003, Srinivasan vd. 2010, Kandalam vd. 2015). Alaşım elementlerinin ilavesi sonucu alaşımın mukavemeti artarken hegzagonal sıkı paket kafes yapısı nedeniyle düşük olan tokluk değeri daha da kötüleşir. Metalik malzemelerin mukavemet ve tokluğunu aynı anda iyileştirmenin tek yolu tane boyutunun küçültülmesidir. Tane boyutunun inceltmesi yüksek sertlik, yüksek mukavemet, gelişmiş aşınma dayanımı ve gelişmiş tokluk ile sonuçlanır (Wu vd. 2012, Shi vd. 2013, Li vd. 2015, Jain vd. 2010). Bunun yanında ince tane yapısı daha homojen bir mikroyapı oluşumunu sağladığından, segregasyon ve gözenek oluşumunu engelleyip korozyon dayanımının artmasını sağlayabilir (Alvarez-Lopez vd. 2010, Argade vd. 2012, Easton ve StJohn 1999, Liao vd. 2013, Song ve StJohn 2002). Son dönemde Mg-Al alaşımlarında SiC ile tane inceltme üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bazıla-

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: erdemkarakulak@kocaeli.edu.tr

rında çekirdeklenmenin SiC partikülleri üzerinde (Cai vd. 1999), bazı çalışmalarda ise çekirdeklenmenin Al_2MgC_2 üçlü bileşiği üzerinde olduğu ortaya atılmaktadır (Huang vd. 2011). Öte yandan alüminyum içermeyen alaşımlarda kullanılan en önemli tane inceltme yöntemi zirkonyum ilavesidir. Zr ($a=0.323$ nm ve $c=0.514$ nm) ve Mg'nin ($a=0.320$ nm ve $c=0.520$ nm) kafes parametreleri oldukça yakındır (Lee vd. 2000b). Bu durum sıvı metal içerisinde bulunan zirkonyum partikülleri üzerinde magnezyum tanelerinin çekirdeklenmesi ve tane inceltmenin gerçekleşmesini sağlar. Ancak Zr tane incelticilerin maliyeti yüksek olduğundan ve alüminyum içeren alaşımlarda kullanılmadıklarından alternatif tane inceltme yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yapılan bu çalışmada saf magnezyum içerisine farklı oranlarda Zr ve SiC ilavesi yapılmış ve tane boyutundaki değişim incelenerek iki tane incelticinin performansı karşılaştırılmıştır. Tane boyutunda elde edilen değişimin malzeme özelliklerine etkisini belirlemek için sertlik, çekme ve basma testleri gerçekleştirilmiştir.

2. Gereç ve Yöntem

Deneysel çalışmada kullanılacak metaller 8 kg kapasiteli rezistanslı bir fırın kullanılarak eritilmiş ve farklı oranlarda tane inceltici ilavesiyle döküme hazır hale getirilmiştir. Her bir döküm için 4 kg metal eritilmiş ve sıvı metal 100 mm çapa ve 230 mm yüksekliğe sahip silindirik şeklindeki çelik kalıp içerisine transfer edilmiştir. İçinde sıvı metal bulunan kalıp üst kısmı rezistanslı ısıtıcı alt kısmında ise su haznesi olan bir cihaza yerleştirilmiştir. Burada sıvı metal sıcaklığı 680 °C'de sabitlendikten sonra her bir alaşım için 2 adet TP1 numunesi dökülmüştür TP1 numuneleri olarak adlandırılan numuneler alüminyum alaşımlarında kullanılan tane incelticilerin performansını belirlemek için kullanılmaktadır (AA 2012). Bu numuneler tabanı 25 mm üst kısmı 75 mm ve yüksekliği 90 mm olan kesik koni şekiline

sahiptir. Bu numunelerin dökümünde 3 mm kalınlıkta çelik sacdan yapılmış kalıplar kullanılır. Son yıllarda birçok araştırmacı bu numuneleri magnezyum alaşımlarında da kullanmaktadır. Bu çalışmanın bir diğer amacı da TP1 numunelerinin magnezyum alaşımlarında kullanılan tane incelticilerin performansının belirlenmesinde sağlıklı olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesidir. TP1 numunelerinin dökümünden sonra kalan sıvı metal çelikten üretilmiş silindirik kalıp ile birlikte alt kısımdaki soğutma suyunun içine daldırılarak katılaşmanın tamamlanması sağlanmıştır. Bu silindirik parçadan DIN 50125 standartına uygun çekme ve basma numuneleri işlenmiştir. Sertlik ölçümleri ise yine bu silindirik parçalardan kesilen 15x15x15 mm boyutundaki küp şeklindeki parçalarda gerçekleştirilmiştir. Döküm öncesinde tüm kalıplar 350 °C'ye ön ısıtılmıştır. Ergitme ve döküm işlemleri sırasında magnezyum metalinin oksitlenmesini engellemek için sıvı metal sürekli olarak % 0.3 SF_6 + Ar gaz karışımı ile korunmuştur. Dökülen alaşımların kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir.

Dökülen alaşımlarda tane inceltici olarak 2 µm ortalama partikül boyutuna sahip SiC kullanılırken Zr için %33 zirkonyum içeren Mg-Zr master alaşım kullanılmıştır. Küçük boyutlu katı partiküllerin sıvı metal içerisine karıştırılması problemler ortaya çıkardığından SiC ve magnezyum talaşları 3 saat boyunca bilyalı değirmen ile karıştırılarak elde edilen karışım sıvı metale ilave edilmiştir. Şekil 1'de bilyalı değirmende karıştırma sonucu elde edilen karışımın görüntüsü verilmiştir. Saf magnezyuma ağırlıkça % 0.2, 0.4 ve 0.6 SiC ve Zr ayrı ayrı ilave edilmiştir. TP1 numuneleri metalografik olarak hazırlanıp standarda uygun şekilde tane boyutu ölçümü yapılmıştır. Tane boyutu ölçümünde çizgi (line intercept) yöntemi kullanılmıştır. Silindirik numunelerden işlenen parçalara ise oda sıcaklığında Vickers sertlik testi, basma testi ve çekme testi uygulanmıştır. Her numune için 10 sertlik testi yapılırken, 5'er adet çekme

Çizelge 1. Gerçekleştirilen dökümlerin kimyasal analiz sonuçları.

	Zr (% ag.)	Si (% ag.)	Fe (% ag.)	Al (% ag.)	Mn (% ag.)	Zn (% ag.)	Mg (% ag.)
SafMg	0,005	0,006	0,018	0,011	0,0028	0,0007	Kalan
Mg-0,2Zr	0,17	0,003	0,0018	0,015	0,003	0,0008	Kalan
Mg-0,4Zr	0,346	0,002	0,0033	<0,010	0,018	0,002	Kalan
Mg-0,6Zr	0,568	0,004	0,0031	<0,010	0,018	0,002	Kalan
Mg-0,2SiC	0,006	0,12	0,039	0,024	0,0038	0,0016	Kalan
Mg-0,4SiC	0,008	0,292	0,036	0,015	0,02	0,002	Kalan
Mg-0,6SiC	0,005	0,467	0,018	<0,010	0,021	0,002	Kalan

ve basma testi yapıp elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır ve standard sapma değerleri hesaplanmıştır.

3. Bulgular

3.1. Tane Boyutu Ölçümü

SiC ve Zr ilavesi sonucunda her iki alaşım için elde edilen tane boyutu değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi herhangi bir ilave olmadığında saf magnezyumun tane boyutu yaklaşık olarak 3.2 mm civarında olmaktadır. SiC ilavesiyle malzemenin tane boyutu azalsada SiC'ün tane inceltme kapasitesi zirkonyuma nazaran çok daha zayıftır. % 0.6 SiC ilavesi ile 1.92 mm (tane boyutunda % 40 azalma) ortalama tane boyutu elde edilirken bu değer % 0.6 Zr için 0.125 mm'dir (tane boyutunda % 95 azalma). Zirkonyumun SiC'e kıyasla bir diğer üstünlüğü ise tane boyutu dağılımının çok dar olmasıdır. Bu durum grafikteki hata çubuklarından anlaşılmaktadır. Zr hem daha ince

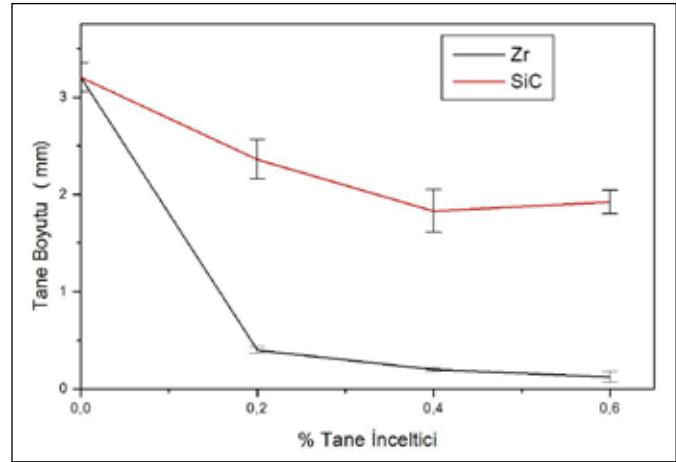
taneli yapı hem de daha homojen tane boyutu sağlayarak çok daha efektif bir tane inceltici olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3'te saf magnezyum, % 0.6 SiC ve % 0.6 Zr ilaveli numunelerin mikroyapıları görünmektedir. (Saf Mg ve SiC içeren numunelerin tane boyutu Zr içeren numuneye göre çok daha kaba olduğundan farklı büyütmeye sahip görüntüler verilmiştir. Tane boyutları arasındaki farkın anlaşılabilmesi için verilen mikroyapıdaki ölçekler göz önünde bulundurulmalıdır.)

3.2. Sertlik Ölçümleri

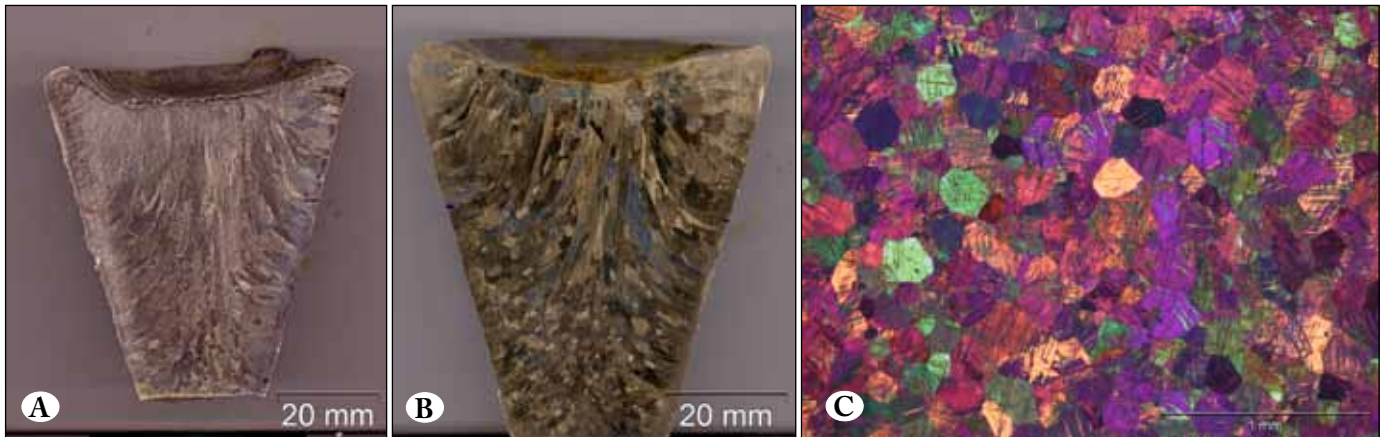
Şekil 4'te verilen grafikte farklı tane incelticilerin eklenmesi sonucunda magnezyumun sertliğinin nasıl değiştiği görülmektedir. % 0.6 SiC ilavesi sonucu sertlik değeri 24.1 HV₅'ten 43 HV₅'e çıkarken % 0.6 Zr ilavesiyle 45.3 HV₅ sertlik elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar teorik bilgilerle örtüşmekte ve malzemenin tane boyutunun azalması ile birlikte sertlik değeri artmaktadır. Zr ilavesi sonucunda daha



Şekil 1. Bilyalı değirmende karıştırılmış Mg-SiC karışımı.



Şekil 2. Zr ve SiC ilavesi sonucu saf magnezyumun tane boyutundaki değişim.

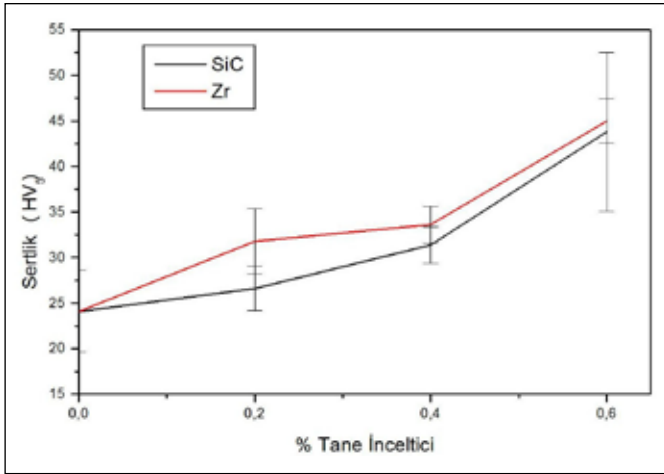


Şekil 3. (A) Saf Mg, (B) Mg-0.6SiC ve (C) Mg-0.6 Zr mikroyapısı.

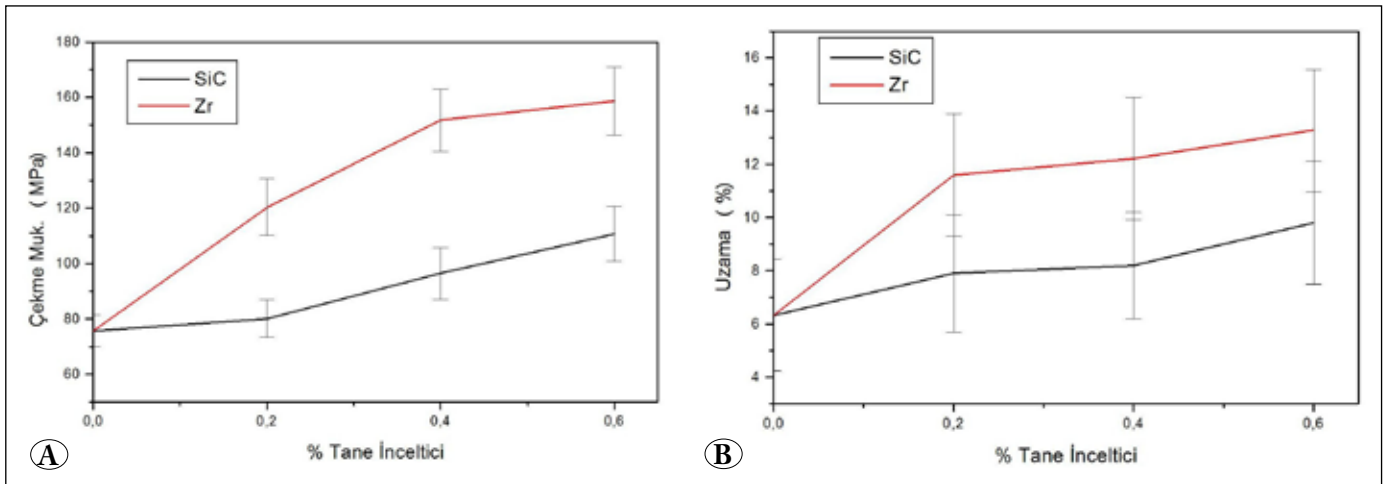
fazla tane inceltme elde edildiğinden Zr ile tane inceltme uygulanan malzemenin sertlik değeri daha yüksektir. Her ne kadar iki tane inceltici arasında elde edilen sertlik farkı az gibi görünse de saf magnezyumun sertliğinin çok düşük olduğu göz önüne alındığında elde edilen artışın önemi ortaya çıkmaktadır. Tane inceltmiş konumda elde edilen sertlik değerlerinin birbirine yakın olmasının nedeni ise SiC ilave edilmiş numunede oluşan standart sapma değerlerinin çok yüksek olmasıdır. % 0.6 SiC içeren numune için standart sapma ± 9 HV₅ civarındadır.

3.3. Mekanik Testler

Saf magnezyum içerisine farklı oranlarda ilave edilen iki farklı tane incelticinin malzemenin mukavemet değerleri üzerindeki etkisini belirlemek için yapılan dökümlerden standarda uygun şekilde işlenen numunelere çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Mekanik testlerden elde edilen veriler Şekil 5 ve 6'da özetlenmiştir.



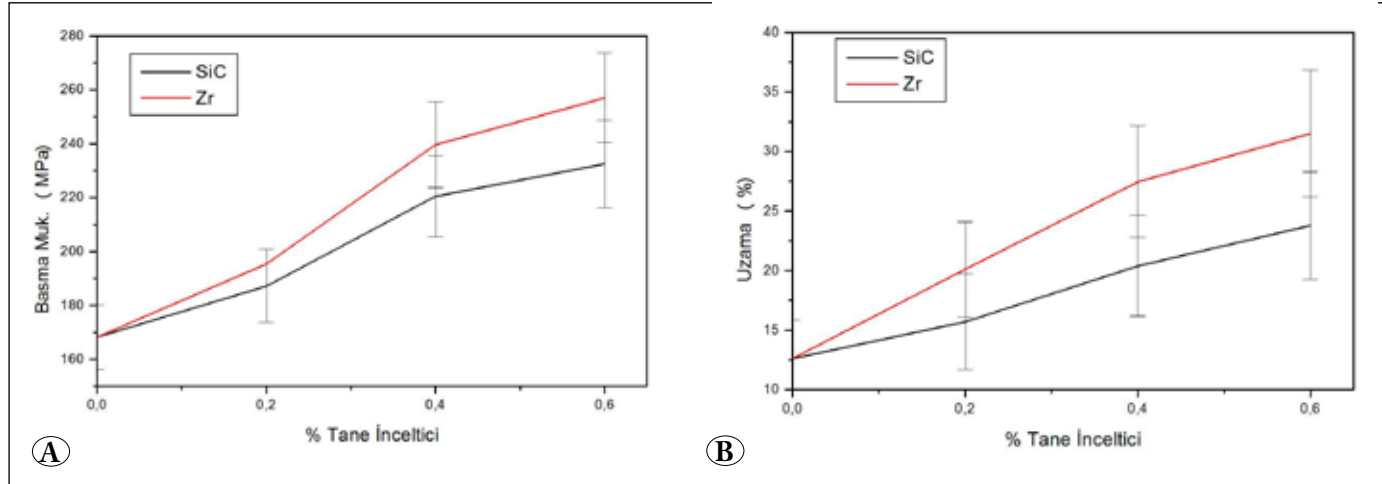
Şekil 4. Zr ve SiC ilavesiyle saf Mg'nin sertliğinde oluşan değişim.



Şekil 5. Çekme test sonuçları (A) çekme mukavemeti ve (B) kopma uzaması.

Her iki şekilde görüldüğü gibi saf magnezyuma yapılan tane inceltici miktarının artmasıyla birlikte malzemenin mukavemeti artmaktadır. Ancak sertlik sonuçlarına benzer şekilde Zr ilavesi sonucu elde edilen tane inceltme daha fazla olduğundan bu tane incelticinin kullanımında elde edilen mukavemet değerleri SiC ile elde edilen mukavemet değerlerinden daha yüksektir. Kullanılan iki farklı tane inceltici ilavesi sonucunda malzemenin sertlik değerleri arasında çok fazla fark olmamasına rağmen mukavemet ve kopma uzaması değerleri oldukça farklıdır. Bu duruma sertlik test sonuçlarının dağılım aralığının çok geniş olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Teorik olarak Zr ile yapılan tane inceltme sonucu SiC ilave edilen numuneye göre çok daha yüksek sertlik değerleri elde edilmesi gerekmektedir. Ancak Şekil 2'de de görüldüğü üzere SiC ilavesi sonucu elde edilen tane boyut dağılımı çok geniştir. Geniş tane boyutu dağılımı noktasal ölçümler yapılan sertlik ölçümü sırasında çok farklı sonuçların elde edilmesine yol açmıştır.

Mekanik testler sonucu elde edilen uzama değerlerine bakıldığında ise tane inceltme sonucunda alışımda kırılma öncesinde gerçekleşen deformasyon miktarının arttığı gözlenmektedir. Diğer sonuçlarda da olduğu gibi burada da Zr ilavesiyle elde edilen artış SiC'e göre daha yüksektir. Elde edilen bir diğer sonuç ise basma testinde oluşan maksimum şekil değiştirmenin her alışımda için çekme testine oranla daha fazla olmasıdır. Basma testlerinde en küçük tane boyutuna sahip numuneler için yaklaşık olarak kırılma öncesinde % 30 civarında deformasyon oranları kaydedilmiştir. Magnezyum için çok yüksek olan bu değer henüz anlaşılamamıştır ve bu konuyu aydınlatmak için farklı parametreler kullanılarak basma testleri yapılması planlanmıştır.



Şekil 6. Basma test sonuçları (A) basma mukavemeti ve (B) şekil değiştirme.

4. Bulgular ve Tartışma

Yapılan bu çalışmada saf magnezyum içerisine ilave edilen iki farklı tane incelticinin performansı belirlenmiştir. Bu amaçla TP1 numuneleri dökülüp tane boyutu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Farklı oranda ilave edilen Zr ve SiC'ün malzemenin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek için sertlik, basma ve çekme testleri yapıp sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıdaki maddelerle özetlenebilir:

- Alüminyum alaşımlarında kullanılan TP1 yöntemi magnezyum alaşımları içinde sorunsuz olarak kullanılabilir.
- Hem Zr hem de SiC saf magnezyumda tane inceltme etkisine sahiptir. Ancak Zr çok daha efektif bir tane incelticidir.
- Zr ile elde edilen ortalama tane boyutu daha küçük olduğundan sertlik, mukavemet ve uzama değerleri SiC ile tane inceltilen numunelere göre daha yüksektir.
- Tüm alaşımlar için basma testlerinde elde edilen şekil değiştirme miktarı çekme testlerinde elde edilenden büyük oranda fazladır. Magnezyum gibi kafes tipi nedeniyle deformasyon kabiliyeti sınırlı olan bir metalde bu kadar yüksek şekil değiştirme değerlerinin elde edilmesi yapılan deneyler sonucunda açıklanamamıştır. Bu durumun açıklanması için farklı deneyler yapılması planlanmıştır.

Elde edilen bu sonuçların literatürde benzer alaşımlar üzerinde yapılmış çalışmalarla paralellik içerisinde olduğu belirlenmiştir. Örneğin Shen vd. (2014)'e göre AZ31B alaşımı içerisine katılan SiC partikülleri malzemenin tane

boyutunun incilmesi ve malzemenin mukavemetinin artması ile sonuçlanmıştır. Ancak bu çalışmada kullanılan SiC miktarı minimum % 3 olduğundan yapılan ilave malzemenin kopma uzamasının düşmesine neden olmuştur (Shen vd. 2014). Benzer şekilde Shepelev vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, artan SiC miktarıyla birlikte tane boyutunun azaldığı, mukavemet ve sertliğin arttığı ancak kopma uzamasının % 3 SiC ilavesinden sonra azaldığı belirlenmiştir (Shepelev vd. 2011). AZ91 alaşımının kullanıldığı bir başka çalışmada ise tane inceltme sonucunda malzemenin sertlik, mukavemet ve kopma uzaması değerlerinin arttığı belirlenmiştir (Suresh vd. 2009).

Özellikle otomotiv sektöründe kullanımı gün geçtikçe artan magnezyum alaşımlarının kullanım alanının genişleyebilmesi için mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada görüldüğü üzere tane inceltme işleminin mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisi vardır. Farklı alaşımlar üzerinde yapılacak benzer çalışmalar hem magnezyumun kullanımı açısından hem de ülkemizde bu alanda çalışmalar yapan araştırmacılara kaynak oluşturması açısından avantajlı olacaktır.

5. Kaynaklar

- Ali, Y., Qiu, D., Jang, B., Pan, F., Zhang, MX. 2015. Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: A review article. *J Alloy Compd.*, 619: 639-651.
- Alvarez-Lopez, M., Pereda, MD., del Valle, JA., Fernandez-Lorenzo, M., Garcia-Alonso, MC., Ruano, OA., Escudero, ML. 2010. Corrosion behaviour of AZ31 magnesium alloy with different grain sizes in simulated biological fluids. *Acta Biomater.*, 6: 1763-1771.

- Argade, GR., Panigrahi SK., Mishra RS. 2012.** Effects of grain size on the corrosion resistance of wrought magnesium alloys containing neodymium. *Corros Sci.*, 58: 145-151.
- Cai, Y., Taplin D., Tan MJ., Zhou W. 1999.** Nucleation phenomenon in SiC particulate reinforced magnesium composite. *Scripta Mater.*, 41: 967-971.
- Easton, M., StJohn D. 1999.** Grain refinement of aluminum alloys: Part I. the nucleant and solute paradigms—A review of the literature. *Metall Mater Trans A*, 30A: 1613-1623.
- Freidrich, H., Schumann S. 2001.** Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry. *J Mater Process Tech.*, 117: 276-281.
- Huang, Y., Kainer KU., Hort H. 2011.** Mechanism of grain refinement of Mg-Al alloys by SiC inoculation. *Scripta Mater.*, 64: 793-796.
- Jain, A., Basu B., Manoj Kumar BV., Harshavardhan S., Sarkar J. 2010.** Grain size–wear rate relationship for titanium in liquid nitrogen environment. *Acta Mater.*, 58: 2313-2323.
- Kandalam, S., Agrawal P., Avadhani GS., Kumar S., Suwas S. 2015.** Precipitation response of the magnesium alloy WE43 in strained and unstrained conditions. *J Alloy Compd.*, 623: 317-323.
- Lee, YC., Dahle, AK., StJohn, DH. 2000.** The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metall Mater Trans A*, 31: 2985-2906.
- Lee, YC., Dahle, AK., StJohn, DH. 2000.** Grain refinement of magnesium. *Magnesium Technol.*, p:211-218 Nashville.
- Li, J., Lu, Y., Zhang, H., Xin, L. 2015.** Effect of grain size and hardness on fretting wear behavior of Inconel 600 alloys. *Tribol Int.*, 81: 215-222.
- Liao, J., Hotta, M., Motoda, S., Shinohara, T. 2013.** Atmospheric corrosion of two field-exposed AZ31B magnesium alloys with different grain size. *Corros Sci.*, 71: 53-61.
- Mao, Y., Li, Z., Feng, K., Guo, X., Zhou, Z., Dong, J., Wu, Y. 2015.** Preparation, characterization and wear behavior of carbon coated magnesium alloy with electroless plating nickel interlayer. *Appl Surf Sci.*, 327: 100-106.
- Nie, KB., Deng, KK., Wang, XJ., Gan, WM., Xu, FJ., Wu, K., Zheng, MY. 2015.** Microstructures and mechanical properties of SiCp/AZ91 magnesium matrix nanocomposites processed by multidirectional forging. *J Alloy Compd.*, 622: 1018-1026.
- Pekgülyüz, MO., Kaya, AA. 2003.** Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Adv Eng Mater.*, 5: 866-878.
- Shen, MJ., Wang XJ., Li, CD., Zhang MF., Hu, XS., Zheng, MY., Wu, K. 2014.** Effect of submicron size SiC particles on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium matrix composite. *Mater Design.*, 54: 436-442.
- Shepelev, D., Klempf, J., Bamberger, M., Katsman, A. 2011.** Grain refinement and mechanical properties enhancement of AZ91E alloy by addition of ceramic particles. *J Mater Sci*, 46:5798-5806.
- Shi BQ., Chen, RS., Ke, W. 2013.** Influence of grain size on the tensile ductility and deformation modes of rolled Mg-1.02 wt.% Zn alloy. *J. Magnesium Alloy.*, 1: 210-216.
- Song, G., StJohn, D. 2002.** The effect of zirconium grain refinement on the corrosion behaviour of magnesium-rare earth alloy MEZ. *J. Light Met.*, 2: 1-16.
- Suh, J., Victoria-Hernandez, J., Letzig, D., Golle R., Yi, S., Bohlen, J., Volk, W. 2015.** Improvement in cold formability of AZ31 magnesium alloy sheets processed by equal channel angular pressing. *J Mater Process Tech.*, 217: 286-293.
- Suresh, M., Srinivasan, A., Ravi, KR., Pillai, UTS., Pai, BC. 2009.** Influence of boron addition on the grain refinement and mechanical properties of AZ91 Mg alloy, *Met. Sci. Eng. A*, 525: 207-210.
- Srinivasan, A., Swaminathan, J., Gunjan, MK., Pillai, UTS., Pai, B. C. 2010.** Effect of intermetallic phases on the creep behavior of AZ91 magnesium alloy. *Mater Sci Eng A-Struct.*, 527: 1395-1403.
- Tahreen, N., Chan, DL., Nouri, M., Li DY. 2015.** Influence of aluminum content on twinning and texture development of cast Mg–Al–Zn alloy during compression. *J Alloy Compd.*, 623: 15-23.
- The Aluminum Association. 2012.** Standard test procedure for aluminum alloy grain refiners 2012.
- Wu, D., Chen, RS., Tang, WN., Han EN. 2012.** Influence of texture and grain size on the room-temperature ductility and tensile behavior in a Mg–Gd–Zn alloy processed by rolling and forging. *Mater Design*, 41: 306-313.
- Yaganeh, M., Saremi, M. 2015.** Corrosion inhibition of magnesium using biocompatible alkyd coatings incorporated by mesoporous silica nanocontainers. *Prog Org Coat.*, 79: 25-30.